

피라미의 유영특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Swimming Performance of Pale Chub(*Zacco platypus*)

박성용* / 김서준** / 이승휘*** / 윤병만****

Park, Seongyong / Kim, Seojun / Lee, Seung-Hwi / Yoon, Byungman

Abstract

The local migration or movement behavior of fishes in streams are related to feeding, spawning, growing, dispersing, and refuging. The pale chub (*Zacco platypus*) is a dominant species that migrates locally and inhabits in river and stream in Korea. However, dams, weirs, culverts and other regulatory structures are physical barriers that limit fish movement and fragment habits and populations. If main stream and off-channel habitats are connected with culverts, they would restrict the small fish as pale chub movement due to the high flow velocities and low depths. But in Korea, there is no experimental study to evaluate the swimming performance of species in Korea. Therefore, it is difficult to proposed that design guidelines for pass fishes through culverts. The purpose of this experimental study is to evaluate the swimming performance of pale chubs. A series of swimming performance test has been used in both of the fixed velocity and the incremental velocity methods in an experimental flume. As a result, the critical swimming speed for pale chub(body length 8.9 cm) was found to be about 0.7 m/s. Therefore, the flow velocity for culvert design in the low flow condition should not be exceed the its swimming ability, especially 0.7 m/s for pale chubs(body length 8.9 cm). And the minimum depth for culvert design in the low flow condition should not be lower than the fish body height add a dorsal fin height.

keywords : Pale chub, Swimming performance, Critical swimming speed, The flow velocity for culvert design

요 지

어류는 생존과 번식을 위해 회유 또는 이동을 하며, 이러한 회유나 이동은 어종에 따라 넓은 범위에서 이루어 질 수도 있고 국지적으로 이루어 질 수도 있다. 피라미는 한국의 강과 하천에 우점종으로 서식하는 어종이다. 그러나 하천에 설치된 댐, 보, 암거 등은 어류가 이동하거나 번식하는데 많은 장애가 되고 있다. 실제로 어류 서식처간의 연결 부가 배수암거(culvert)로 설치되어 있는 경우에는 평상시 피라미와 같이 몸집이 작은 어류가 이동하는데 장애를 줄 정도의 빠른 유속과 낮은 수심이 발생되고 있다. 그러나 국내에서는 국내 하천에 서식하고 있는 민물고기의 유영특

* 명지대학교 토목·환경공학과 박사과정

Ph.D, Dept. of Civil & Environmental Eng, MyongJi University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-Do 449-728, Korea
(e-mail: sypark@dohwa.co.kr)

** 명지대학교 토목·환경공학과 박사과정, 교신저자

Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng, MyongJi University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-Do 449-728, Korea

*** 호남대학교 생명과학과 교수

Prof, Dept. of Biology, Honam University, 59-1 Seobong-dong, Gwangsan-gu, Gwangju 506-714, Korea

**** 명지대학교 토목·환경공학과 교수

Prof, Dept. of Civil & Environmental Eng, MyongJi University, San 38-2 Namdong, Yongin, Gyeonggi-Do 449-728, Korea

성에 관한 연구가 충분치 않아 현실적으로 어도기능을 위한 합리적인 배수암거 설계기준을 마련하기가 어려운 실정이다. 본 연구의 목적은 배수암거의 평상시 어도기능을 위한 설계유속을 제시하기 위해 국내 하천의 우점종이자 국지회유성 어종인 피라미의 유영특성을 분석하고자 한다. 피라미의 유영특성을 파악하기 위한 실험은 증진유속방법(incremental velocity test)과 고정유속방법(fixed velocity test)을 병행하여 수행하였다. 실험 결과 피라미(체장 8.9cm)의 유영특성 중 한계유영속도는 0.7 m/s 정도로 나타났다. 따라서 홍수기를 제외한 평상시 유량조건에서 배수암거 설계유속은 피라미(체장 8.9cm)를 대상어종으로 할 경우 0.7 m/s 를 초과하지 않아야 할 것으로 판단된다. 최소수심은 등지느러미까지 충분히 물속에 잠길 수 있는 수심이 필요한 것으로 파악되었다.

핵심용어 : 피라미, 유영특성, 한계유영속도, 배수암거 설계유속

1. 서 론

어류는 먹이를 구하고, 산란하고, 성장하고, 집단에서 분산하고, 위협으로부터 도피하기 위해 반드시 이동한다(McKeown, 1984; Harvey, 1991; Fausch and Young, 1995; Mallen-Cooper, 2001). 어류의 회유나 이동은 어종에 따라 하천과 바다사이의 넓은 범위에서 이루어 질 수도 있고 하천 내에서만 국지적으로 이루어 질 수도 있다. 해양수산부(2004)에서 탐진강과 탄천에서 이동하는 어종을 조사한 결과 바다와 하천을 회유하는 종은 은어 1종이고 나머지는 모두 담수어종이었다. 또한 국내 대부분의 담수어종이 하천 내에서 국지적 회유 또는 이동을 하며, 그 중 피라미가 58%를 차지하는 대표적인 국지회유성 어종으로 나타났다.

댐, 보, 배수암거, 기타 일상적인 수공구조물은 어류의 이동을 제한하는 물리적인 장애물로 서식처와 개체수를 분리시킨다(Baxter, 1977; Harris, 1984; Jacobs, 1990; Mallen-Cooper *et al.*, 1995). 인간이 하천에 수공구조물을 설치하면서 어류 서식처(habitat)와 국지적 회유경로의 공간적 범위를 제한하게 되면 하천생태계에 매우 위험한 문제가 발생될 수 있다. 실제로 배수암거가 설치되어 있는 구간에는 평상시에도 피라미와 같은 작은 어류가 이동하는데 장애가 될 정도로 빠른 유속 또는 낮은 수심이 발생하는 경우가 많다.

미국과 뉴질랜드 등 외국에서는 배수암거의 설계유량과 유속기준이 홍수기간과 어류의 소상기간별로 필요한 기능에 따라 제시되어 있어 홍수 시에는 홍수소통기능, 평상시에는 어도기능이 발휘될 수 있도록 설계하고 있다. 어류의 유영특성도 다양한 어종별로 실험적 연구결과에 의해 제시되어 있어 어도기능을 위한 설계유속과 수심기준은 대상어종의 유영특성과 배수암거의 길이에 따라 다르게 적용하고 있다. 또한 어도기능이 부족한 배수암거에는 어도기능을 강화하기 위해 암거식 어도(culvert fishways)를 설계지침에 따라

설치하고 있다.

반면에 국내에서는 배수암거의 설계유량과 유속기준이 홍수소통기능에 대해서만 제시되어 있어 평상시 어도기능은 고려하지 못하고 있다. 더구나 암거식 어도는 기타형식으로 명칭만 구분되어 있고 설계기준은 제시되어 있지 않은 실정이다. 어도에 대한 일반적인 기준으로 한국수자원학회(2005a)는 하천설계기준·해설 제29장 어도의 내용에서 어도 내 설계유속을 갈수 시 취수잔량이 유하될 때 모든 어종에 대해 0.5~1.0m/s로 제시하고 있다. 또한 어류의 유영속도도 국내 어종에 대한 연구가 미비하여 외국의 회유성어종 연구 자료인 순항속도 2~4BL, 돌진속도 10BL로 제시하고 있다. 그러나 이러한 외국 어종의 유영특성을 적용해 어도를 설계하였을 경우 어도의 기능을 발휘하지 못할 수 있다는 문제점이 있다. 실제 어류의 유영특성은 어종별로 다르기 때문에, 어도내 설계유속과 수심기준이 외국과 같이 어종별로 다르게 제시되어야 어도기능을 효과적으로 발휘할 수 있을 것이다.

위에서 살펴본 바와 같이 국지회유성 어종을 포함한 대부분의 어류가 생존을 위해 국지적 회유 또는 이동하는 습성이 있음에도 불구하고 국내에 설치된 배수암거는 평상시에 고유속과 저수심의 흐름이 발생할 수 있어 어류의 이동에 장애가 되고 있는 실정이다. 또한 어도에 관한 국내 설계기준상 국내 하천에 서식하는 다양한 어종별 유영특성을 고려하지 못하는 문제점 등을 포함하고 있다. 따라서 배수암거의 어도기능을 확보하기 위한 설계기준의 정립이 필요하며, 이를 위해 국내 국지회유성 어종의 유영특성과 어도의 수리특성에 대한 연구가 시급한 실정이다.

본 연구의 목적은 배수암거 설계 시 어도기능을 고려할 수 있도록 국내 하천의 우점종이자 국지회유성 어종인 피라미의 유영특성을 분석하는 것이다.

피라미의 유영특성에 대해서는 증진유속 방법과 고정유속 방법 실험에서 나타난 유영행동의 분석을 통해

이동속성과 한계유영속도 등을 파악하였다. 또, 피라미와 다른 체형과 습성을 가진 어종도 동일한 방법으로 실험함으로써 동일한 수리조건에서 피라미와 차이점을 비교하였다.

2. 기존 이론 및 연구 동향

2.1 어류의 체장

김익수(2002)는 어류의 신체를 Fig. 1과 같이 전장(TL, Total Length)과 체장(BL, Body Length)으로 구분하였다. 한편, Anderson and Gutreuter(1983)는 어류의 신체를 Fig. 2와 같이 전장과 체장 사이에 머리부터 꼬리지느러미의 가랑이까지 길이를 구분하여, FL(Fork Length)라고 하였는데, 이는 척추까지의 길이를 체장으로 보기 어려운 참치(tuna)와 같은 어류의 체장을 구분할 때 사용하기 위한 단위로 척추장이라고 할 수 있다.

2.2 유영특성의 구분

물고기의 유영특성은 3가지 다른 분류인 순항(sustained), 전진(prolonged), 돌진(burst)행동으로 구분된다. 유영특성의 분류는 유영한 시간과 근육으로 에너지를 공급하는 생화학적 과정에 의해 구분된다(Beamish, 1978). 유영특성의 구분은 물고기 종류별로 유영속도(swimming speed)와 에너지의 소비시간(time to exhaustion)의 관계에 관한 실험을 통해 파악할 수 있다. 따라서 유영특성의 분류는 유영속도로 많이 표현된다.

유영속도는 유영한 시간에 따라 순항속도(sustained speed), 돌진속도(burst speed) 그리고 그 사이 천이구간을 전진속도(prolonged speed)의 영역으로 본다. Blaxter(1969)는 물고기의 평균적인 전진속도를 2 BL/s(BL:body length)로 추정하였다. Webb(1975)은 자연 상태에서 전진행동(prolonged activity)은 비교적 균

일하지 않은 행동으로 종종 순항(cruising)행동과 교차되다가 갑자기 돌진행동으로 전환될 수 있음을 언급하였다. 또 Blaxter(1969)는 다양한 물고기의 돌진능력(burst capacity)에 관한 광범위한 조사를 수행하였다. Bainbridge(1960)는 3개 어종의 돌진속도(2초정도 기간)를 비교한 결과 종별로 다르기는 하나 비교적 10 BL/s에 근사한다고 보았다. 그러나 물고기의 돌진능력은 돌진하는 시간과 매우 관련이 깊어 시간에 따라 기하급수적으로 감소된다. Beamish(1978)는 물고기의 돌진행동이 2초 이상 지속될 경우에는 4~6 BL/s로 감소된다고 하였으나, Hammer *et al*(1995)은 돌진속도를 일반적으로 10 BL/s로 볼 수 있다고 하였다. 따라서 10 BL/s법칙은 아주 짧은 기간이거나 아니면 돌진속도에 쉽게 도달하는 전형적인 어종에만 해당될 것이다.

물고기의 유영특성은 실험을 통해 순항, 전진, 돌진속도를 구분하지만, 어중에 따라 명확하게 구분되지 않는 경우도 있다(Peake *et al.* 1997).

(1) 순항속도

어류의 순항속도는 근육의 피로감이 없이 긴 기간 동안(200분 초과) 유지할 수 있는 유영속도를 의미한다(Beamish, 1978). 순항속도에서는 에너지가 유산소운동 과정을 통해 산화(붉은색)근육질(oxidative muscle fibers)에서 천천히 공급되며, 이런 근육질은 쉽게 피로감을 느끼지 않으나 큰 힘을 내지 못한다(Webb, 1984).

(2) 전진속도

어류의 전진속도는 일정기간(20초 이상 200분 이하)동안 유지할 수 있는 유영속도를 의미한다(Beamish, 1978). 전진속도는 순항속도와 돌진속도사이의 유영속도 범위에 해당한다. 전진속도에서는 에너지가 유산소와 무산소 운동 과정을 통해 산화(붉은색)근육질에서 천천히, 산화성 당분해(분홍색)근육질(oxidative glycolytic muscle fibers)과 당분해(흰색)

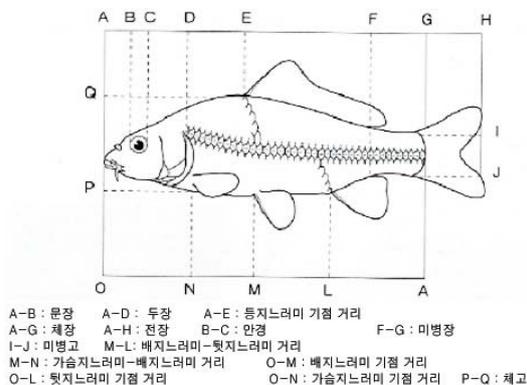


Fig. 1. Measures of Fish Length (김익수, 2002)

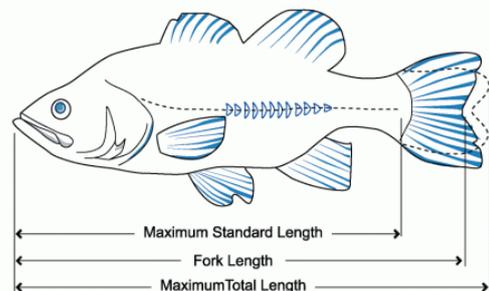


Fig. 2. Measures of Fish Length (Anderson and Gutreuter, 1983)

근육질(glycolytic muscle fibers)에서 빠르게 공급된다. 유영속도가 증가될수록 무산소 신진대사가 된다(Webb, 1984). 전진속도는 어류가 과도한 육체적 피로감을 느끼지 않으면서 장시간 유지할 수 있는 유영속도이다. 이 속도는 배수암거의 어도기능 평가와 설계에 일반적으로 적용되는 속도로, 미국의 연방도로청(FHWA : Federal Highway Administration), 농무부(USDA : United States Department of Agriculture), 어류 및 야생동물 관리국(USFWS : U.S. Fish & Wildlife Service) 등 외국의 많은 관리기관의 설계지침서에서 배수암거 설계 시 어도기능을 위한 설계기준으로 사용하도록 추천하고 있다.

예를 들어, 한계유영속도는 전진속도 범위 내에 있는 속도로서 순항속도부터 전진속도까지 변화되는 속도 중에서 최고순항속도(maximum sustained swim speed)에 해당되는 속도이다(Brett, 1964). 한계유영속도는 유영특성 실험에 의해 구할 수 있으며 기존 유영속도에 관한 문헌자료에 자주 제시되고 있다. 일반적으로 한계유영속도에 도달하면 최대산소 소비량이 발생된다고 본다(Farrell and Steffensen, 1987).

어도기능이 있는 배수암거의 설계유량 조건은 FishXing 3판의 사용안내 및 참고서(Furniss *et al.*, 2006)에서 Fig. 3과 같이 소개하고 있다. QPEAK는 배수암거 설계 시 설계홍수량, QHP는 어도기능을 위한 설계유량의 상한치, QLP는 어도기능을 위한 설계유량의 하한치이다. 또 어류가 실제로 이동할 수 있는 설계유량의 범위는 수로의 규모에 따라 한계유영속도 이하의 유속과 유영하는데 필요한 최소수심이 확보되는 유량의 범위로 제한될 것이다.

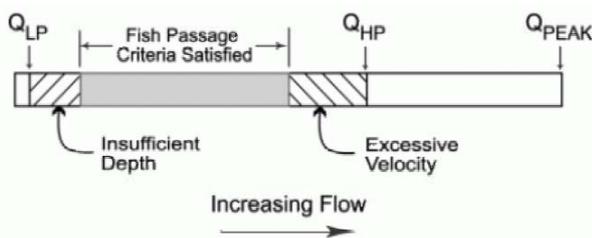


Fig. 3. Flow Range of Fish Passage (Furniss *et al.*, 2006)

(3) 돌진속도

어류의 돌진속도(burst speed)는 아주 짧은 기간 동안(20초 미만)만 유지할 수 있는 가장 빠른 유영속도이다(Beamish, 1978). 돌진속도에서는 에너지가 처음부터 무산소 운동 과정을 통해 당분해(흰색) 근육질에서 빠르게 공급된다(Webb, 1984). 돌진속도는 짧은 기

간에 큰 힘을 내기 위해 많은 에너지를 공급하기 때문에 극도의 피로감과 소비과정의 누적이 발생된다(Colvavecchia *et al.*, 1998). 돌진속도는 어류가 배수암거의 유입부나 유출부와 같이 낙차가 있거나 고유속이 발생하는 짧은 구간을 통과할 때 고려하는 유영특성으로 어종별로 도약능력을 평가할 때도 사용된다.

2.3 유영특성의 실험방법

물고기가 이동할 때 얼마나 빨리 유영하는지와 유영속도를 유지하는 능력이 얼마나 되는지에 대한 관심과 연구는 18세기 중반부터 지금까지 지속되고 있다. 물고기의 유영특성을 평가하기 위한 실험방법은 Brett(1964, 1967)에 의해 소개된 2가지 실험방법이 많은 학자들의 수많은 견해 차이를 거치면서 지금까지 일반적으로 사용되고 있다.

Brett(1964, 1967)의 2가지 실험방법은 고정유속방법과 증진유속방법으로 구분되며 물고기의 한계유영속도(Ucrit)로 정의되는 물고기의 유산소 유영특성의 극한값을 정량화하기 위한 실험이다. Brett(1964, 1967)의 실험 이후 여러 학자들에 의해 수행되는 실험에서는 실험방법별로 유속단계와 실험시간 등의 기준을 다르게 적용하고 있다. 이는 물고기의 한계유영속도에 영향을 미치는 여러 요소들을 면밀히 분석하고 자연 상태에서 가질 수 있는 한계유영속도의 근사치를 파악하기 위함이다.

(1) 고정유속방법 실험

고정유속방법 실험은 물고기가 흐르는 물속에 노출된 상태로 지정된 유속단계에서 유속의 변화없이 실험하는 방법이다. 실험어종으로 선택된 물고기는 휴식기간 동안 수조에서 적응과정을 거치게 되며 흐름유속은 단계별로 증가시킨다(Beamish, 1966, 1968; Rulifson, 1977; Davison, 1984). 실험속도에 도달할 때까지 유속의 증가방법은 작은 간격으로(Jones *et al.*, 1974), 또는 조금 급격한 간격으로(Broughton *et al.*, 1980), 또는 급격한 간격으로(Hunter, 1971; Krueger *et al.*, 1968) 증가시키게 된다. 실험유속에 도달하게 되면 물고기가 피로를 느낄 때까지의 시간을 측정하고 다음 단계를 반복한다. Brett(1967)은 고정유속방법 실험을 통하여 물고기의 50%가 피로를 느낄 때 평균 최고순항속도(the mean maximum sustained speed)에 해당한다고 보았다.

통계적 측면에서 볼 때 고정유속방법 실험은 같은 치수와 조건을 가진 다수의 실험 물고기가 필요할 것이며, 장기간 실험동안 실험자의 세심한 주의가 요구된다.

(2) 증진유속방법 실험

증진유속방법 실험은 Brett(1964)에 의해 제안된 방법으로 증가되는 유속의 흐름 속에서 물고기가 유영하는 힘을 파악하는 실험이다. 흐름유속은 유영속도로써 점진적으로 증가시키지 않고, 단계별로 유속을 증가시켜 피로가 발생할 때까지 시간을 측정한다. 한계유영속도를 측정하는 식은 다음과 같다.

$$U_{crit} = V_p + \left(\frac{t_f}{t_i}\right) V_i$$

V_i : 단계별 유속차 (cm/s)

V_p : 물고기가 피로를 느낀 유속단계의 전 단계 유속 (cm/s)

t_f : 물고기가 피로를 느낀 유속단계에서 피로를 느끼기 전까지 유영한 시간 (s)

t_i : 유속단계별 실험시간 (s)

증진유속방법 실험에서 유속단계별 실험시간은 초기에 60분을 유지하였으나 최근에는 10분 정도로 줄어드는 추세이다. 유속단계별 실험시간은 실제 물고기가 압거를 통과하는데 필요한 유영시간과 관련되므로 본 실험적 연구에서는 10 m 수로를 기준으로 할 때 10분으로 결정하였다.

2.4 실험어종의 채집 및 생리생태

기존 이론 및 연구동향에 의하면 어류의 유영특성은 어종별 습성과 체형에 따라 달라진다고 하였다. 본 실험적 연구에서는 국내 하천에서 서식하고 있는 국지회유성 어종 중에서 우점종(dominant species)인 피라미를 대상어종으로 선정하였다. 피라미는 하천환경정비

시 대상어종으로 가장 많이 선정되고 있는 어종으로 활동적이며 방추형에 가까운 체형을 가지고 있다. 또한, 습성과 체형이 다른 어류와의 차이점을 비교하기 위해 습성과 체형이 다른 어종도 비교어종으로 실험을 수행하였다. 실험어종은 Table 1과 같이 자연산을 채집하였으며 채집 시 생식기능이 있는 성어(adult)로 의뢰하였다. 채집한 실험어종의 생리생태는 Table 2와 같다.

3. 실험장비 및 방법

3.1 실험수로와 측정 장비

피라미의 유영특성을 평가하기 위한 실험장비는 크게 실험수로와 측정 장비로 구분된다. 먼저 실험수로는 Fig. 4와 같이 측면이 유리로 된 실제 수로크기의 실험수로(폭 0.8 m, 높이 0.77 m, 길이 20 m)에 거리를 측정할 수 있도록 눈금자와 격자망을 부착하였다. 실험수로에는 펌프시설, 유량조절용 웨어, 정수관, 수로경사가 설치되어 있어 0.1 m/s 유속단계별 조절이 가능하다. Fig. 5는 실험수로에서 물고기가 이동하는 유영특성을 수로 위에서 동영상으로 촬영하기 위한 평면 촬영장비(DVR SET)이며, 측면촬영은 캠코더를 이용하였다. 유속측정은 Fig. 6과 같이 1차원 유속계를 사용하였다.

3.2 증진유속방법 실험

증진유속방법 실험은 Table 3과 같이 증진되는 6가지 유속단계별로 일정시간(10분)동안 물고기를 유영시켜 물고기가 피로를 느끼는 유속단계에서 유영시간과 유속을 측정하였다. 물고기가 피로를 느끼는 시점의 유영시간과 유속을 측정함으로써 물고기가 피로를 느끼기 직전의 한계유영속도를 평가하였다.

Table 1. Locations and Methods for Capturing Fishes

river name	location	date	species	note
Majungcheon	Chungnam Buyeo	2006.10.15~10.25	Pale chub	wild
Bongdangcheon	Chungnam Boryeong	2006.10.15~10.25	Crucian carp	
Ippocheon	Chungnam Buyeo	2006.10.15~10.25	Korea rose bitterling	

Table 2. Selected Fish Species for Experiments

common name	scientific name	body shape	ecological characteristics	
			habitate	spawn duration
Pale chub	<i>Zacco platypus</i>	Fusiform	riffle in the middle stream or in the downstream	5~7 month
Crucian carp	<i>Carassius auratus</i>	Fusiform	pool in stream, lake	4~7 month
Korea rose bitterling	<i>Rhodeus uyekii</i>	Compressiform	pool in stream, lake	4~6 month



Fig. 4. The Experimental Flume

Fig. 5. Digital Video Recording Set

Fig. 6. 1-D Velocity Meter

Table 3. Flow Condition of Incremental Velocity Test

Level	discharge (m ³ /s)	flow depth (m)	mean velocity (m/s)	slope (%)	water temperature (°C)	Fish species and numbers
1	0.016	0.048	0.4	0	18	1) Pale chub : 7 2) Crucian carp : 7 3) Korea rose bitterling : 20
2	0.029	0.064	0.5	0		
3	0.036	0.072	0.6	0		
4	0.058	0.102	0.7	0		
5	0.086	0.144	0.8	0		
6	0.086	0.092	0.9	0.5		

3.3 고정유속방법 실험

고정유속방법 실험은 Table 4와 같이 9가지의 유속 단계별로 실험수로 내 10 m 구간에서 물고기를 유영시킨 후, 각 유속단계별 소상성공율(암거중간 5 m 지점 통과율)을 파악함으로써 물고기가 이동 가능한 평균유속을 평가하였다. 한편 실험수로의 조도계수는 3단계부터 7단계까지 측정수심을 기준으로 HEC-RAS모형을 이용하여 분석하였으며, 그 결과 Manning의 조도계수는 $n = 0.010 \sim 0.011$ 정도로 나타났다.

3.3.1 소상성공율 측정방법

소상성공율의 측정은 평면영상 분석을 통하여 수행

하였으며, 평면영상 촬영은 실험수로 상부에 CCTV 카메라를 3대 설치하여 10 m 구간 전체를 촬영하였다. 소상성공율의 판단기준은 Figs. 7 and 8과 같이 실험수로 구간의 중간지점인 5 m 지점을 통과한 물고기만 소상에 성공한 것으로 평가하였다.

3.3.2 유영속도 측정방법

피라미의 유영속도는 Figs. 9 and 10과 같이 0.2초 간격의 이미지를 분석하여 측정하였다. 일정시간동안 수로 바닥에 0.2 m 간격으로 설치된 격자를 이용해 이동거리를 측정함으로써 피라미가 이동한 상대속도를 구하고, 여기에 수로의 지점유속을 합하여 최종적인 피라미의 유영속도를 구하였다.

Table 4. Flow Condition of Fixed Velocity Test

Level	discharge (m ³ /s)	flow depth (m)	mean velocity (m/s)	slope (%)	water temperature (°C)	Fish species and numbers (Body Length ± standard deviation)
1	0.008	0.038	0.3	0.1	18	1) Pale chub : 100 (8.9±1.1 cm) 2) Crucian carp : 89 (14.3±1.4 cm) 3) Korea rose bitterling : 100 (4.2±0.6 cm)
2	0.019	0.057	0.4	0.1		
3	0.030	0.071	0.5	0.1		
4	0.044	0.087	0.6	0.1		
5	0.065	0.108	0.7	0.1		
6	0.082	0.124	0.8	0.1		
7	0.103	0.144	0.9	0.1		
8	0.065	0.078	1.0	0.37		
9	0.057	0.065	1.1	0.50		

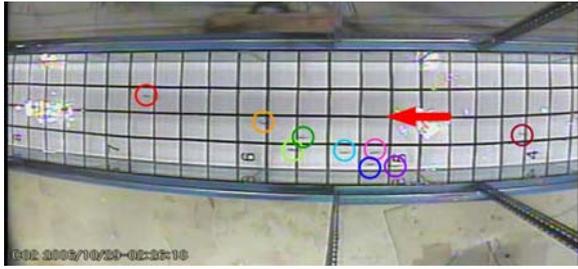


Fig. 7. Moving Routes of Pale Chubs(2:26:18)

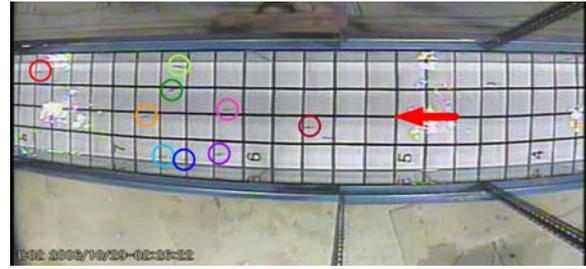


Fig. 8. Moving Routes of Pale Chubs(2:26:22)

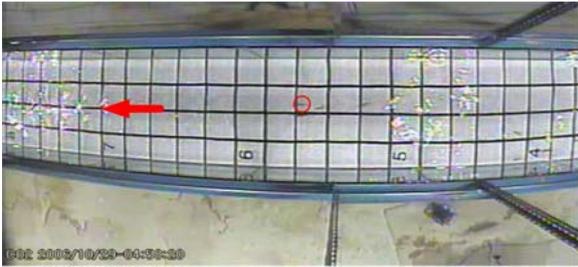


Fig. 9. Measurement of Swimming Speed(before)

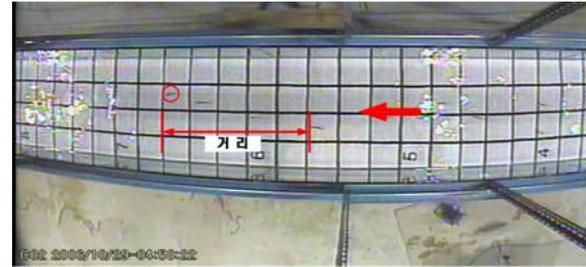


Fig. 10. Measurement of Swimming Speed(after)

4. 유영특성의 실험결과

4.1 증진유속방법 실험결과

증진유속방법 실험결과 평균유속 0.4 m/s에서는 Fig. 11과 같이 대부분 활발히 유영하지만 평균유속 0.7 m/s이상의 유속부터는 Fig. 12와 같이 피라미만 유영하였다. 피라미와 체형이 다른 붕어와 각시붕어의 경우에는 0.5 m/s 유속에서부터는 하류로 밀려 내려가는 현상을 보였다. 피라미의 경우 평균유속 0.7 m/s에서부터는 피로를 느끼며 수로바닥에 몸을 붙이는 모습이 나타났다.

4.2 고정유속방법 실험결과

4.2.1 소상성공율 측정결과

소상성공율은 실험수로 10 m구간 내 중간지점인 5 m 이상을 통과하는 물고기의 비율(소상한 물고기의 수/ 투입한 물고기 수)로 수로의 평면영상 분석을 통해 Fig.

13~15와 같이 나타났다. 피라미의 경우 수로의 평균유속이 0.7~0.8 m/s사이에서 소상성공율의 급격한 하락을 보이고 있으며, 평균유속 1.0 m/s이상에서는 거의 소상하지 못하였다. 반면 붕어와 각시붕어의 경우 전체 유속단계에서 소상성공율이 50%를 넘지 못하였다. 소상성공율은 붕어가 0.5 m/s에서 32%, 각시붕어가 0.4 m/s에서 20%로서 각각 최대치를 나타냈다. 그리고 붕어의 경우 Fig. 16과 같이 체고이하의 수심이 발생되면 옆으로 누워서 유영하는 행동을 보였다.

4.2.2 지점유속 및 개체별 유영속도 측정

실험수로 내 횡단면상 지점별 유속을 측정한 결과 Table 5와 같이 나타났으며, 수로바닥에서의 지점유속은 평균유속의 약 70% 정도임을 알 수 있었다. 또한 측면영상에서 물고기의 이동지점을 분석한 결과 피라미, 붕어, 각시붕어가 모두 수로 바닥 가까이에서 유영하는 행동을 보였다. 특히 피라미의 경우 Figs. 17 and 18에

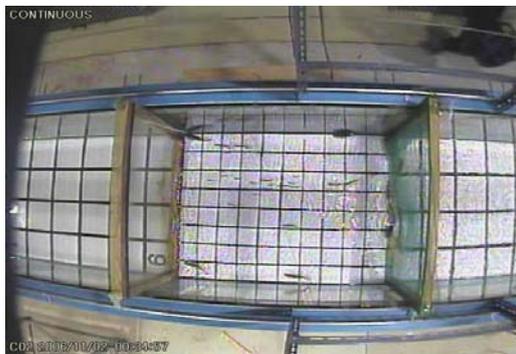


Fig. 11. Picture of Incremental Test(0.4m/s)

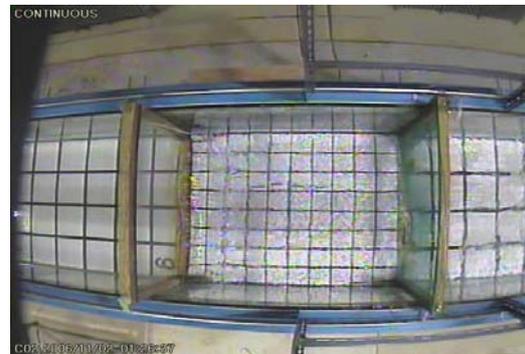


Fig. 12. Picture of Incremental Test(0.7m/s)

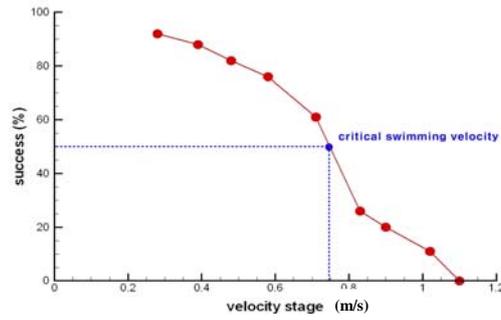


Fig. 13. Proportional success of pale chubs

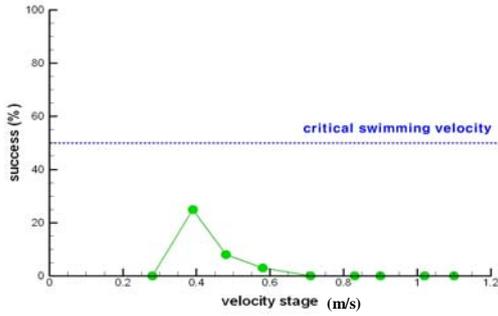


Fig. 14. Proportional Success of Crucian Carps

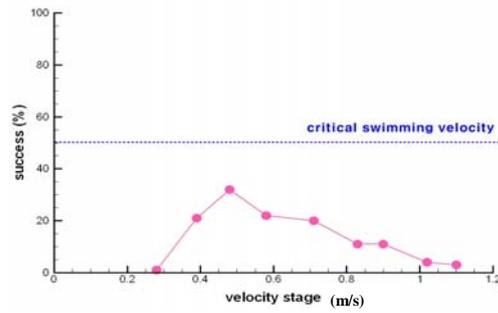


Fig. 15. Proportional Success of Korea Rose Bitterlings

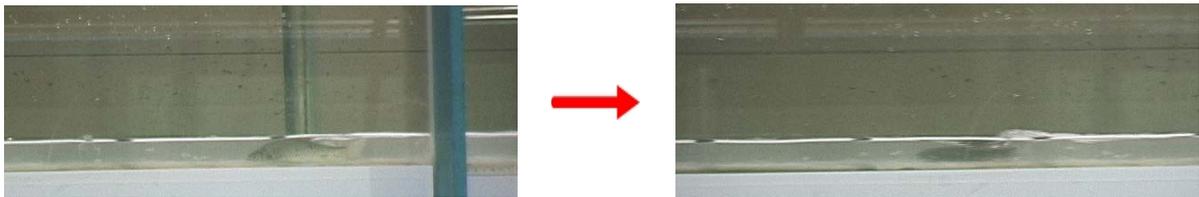


Fig. 16. Swimming Performance of Crucian Carp in Low Depth($V=0.3$ m/s)

서와 같이 수로바닥에 최대한 가까운 지점에서 이동하는 것을 알 수 있었다. 물고기의 개체별 유영속도는 실험단계마다 평면영상 이미지 분석을 통해 물고기의 상

대속도와 지점유속을 합하여 산정하였다. 물고기의 개체별 유영속도를 분석한 결과 Figs. 19 and 21과 같이 개체별로 유영속도의 차이가 있음을 파악하였다.

Table 5. Flow Velocity of Cross Section ($V_{\text{mean}} 0.7$ m/s, Depth 0.12 m)

	bottom	3 cm	5 cm	7 cm	surface
0 (right)	0.50	0.50	0.52	0.50	0.46
20	0.62	0.68	0.69	0.71	0.69
40	0.65	0.70	0.70	0.72	0.68
60	0.59	0.63	0.64	0.65	0.63
80 (left)	0.47	0.46	0.47	0.47	0.46



Fig. 17. Swimming Performance of Pale Chub($V=0.5$ m/s)



Fig. 18. Swimming Performance of Pale Chub($V=0.9$ m/s)

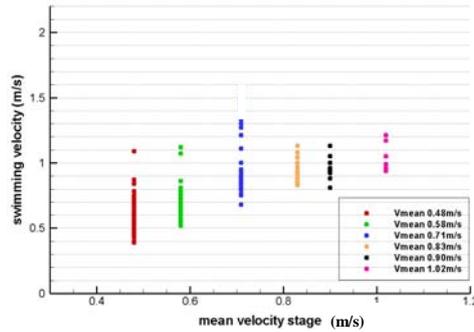


Fig. 19. Swimming Velocity of Pale Chubs

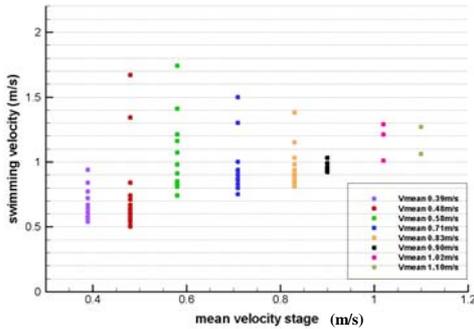


Fig. 20. Swimming Velocity of Crucian Carps

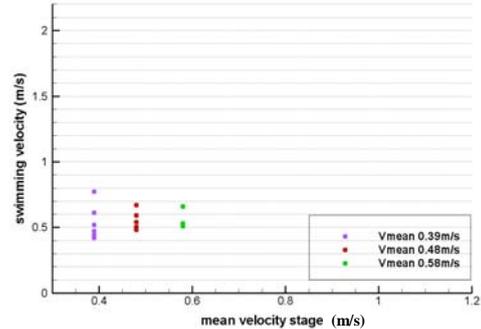


Fig. 21. Swimming Velocity of Korea Rose Bitterlings

5. 결론 및 향후 과제

피라미의 유영특성에 관한 실험적 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 피라미, 붕어, 각시붕어의 유영특성 중 이동습성을 분석한 결과 흐름의 반대방향으로 거슬러 올라가는 소상행동을 보였고, 앞서 나가는 물고기를 따라 군집으로 이동하는 행동도 보였다. 또 이동경로인 수로바닥의 유속을 측정된 결과 평균유속의 70% 정도로 나타나 물고기는 이동시 유속이 낮은 흐름을 찾아가면서 이동하는 것을 확인하였다. 방추형인 피라미가 다른 체형인 붕어나 각시붕어에 비해 이동성향이 강한 것으로 나타났다.
- 2) 한계유영속도를 분석한 결과 피라미(평균체장±표준편차 8.9±1.1 cm)는 0.7 m/s, 붕어(14.3±1.4 cm)는 0.5 m/s, 각시붕어(4.2±0.6 cm)는 0.4 m/s로 나타나 한계유영속도가 체장뿐 아니라 물고기의 체형과 습성에 따라 차이가 있음을 확인하였다.
- 3) 국내 어도 내 설계유속의 범위가 하천설계기준에서 0.5~1.0 m/s로 제시되어 있지만, 평균체장 8.9 cm인 피라미가 대상어종일 경우 어도 내 설계유속의 상한치는 한계유영속도인 0.7 m/s이하로 제한하는 것이 50%이상 어류이동을 위해 필요하다고 판단된다.

향후 피라미의 유영특성에 관한 실험적 연구는 치어(fry), 유어(juvenile), 성어(adult) 등 다양한 체장길이별

로 유영속도를 정량적으로 연구함으로써 어도기능이 있는 배수암거 설계 시 지침으로 활용되어야 할 것이다. 또 피라미뿐만 아니라 다양한 국지회유성 어종에 대해 유영특성의 실험적 연구를 수행하여 어도설계 시 대상어종별 유영특성이 고려된 합리적인 어도설계기준이 제시되어야 할 것이다.

참고 문헌

- 김익수 (2002). 한국의 민물고기. 교학사.
- 한국수자원학회 (2005a). 하천설계기준·해설 <계획편>.
- 해양수산부 (2004). 하천에서의 수산자원 보호를 위한 어도 시설 표준설계·시공 등 표준모형개발 및 운영·관리제도 연구.
- Anderson, R. O. and Gutreuter, S. J. (1983). *Length, weight, and associated structural indices*. Pages 283-300 in L.A. Neilsen and D.L. Johnson, editors. Fisheries Techniques. The American Fisheries Society, Bethesda, MD
- Bainbridge, R. (1960). "Speed and stamina in three fish." *J. Exp. Biol.* Vol. 37, pp. 129-153.
- Baxter, R. M. (1977). "Environmental effects of dams and impoundments." *Annual Review of Ecology and Systematics*, Vol. 8, pp. 255-283.
- Beamish, F. W. H. (1966). "Swimming endurance of some Northwest Atlantic fishes." *J. Fish. Res. Bd Can.*, Vol. 23, pp. 341-347.

- Beamish, F. W. H. (1968) "Glycogen and lactic acid concentrations in Atlantic cod (*Gadus morhua*) in relation to exercise." *J. Fish Res. Bd Can.*, Vol. 25, pp. 837-851.
- Beamish, F. W. H. (1978). "Swimming capacity." *Fish Physiology*, Vol. VII. pp. 101-187.
- Blaxter, J. H. S. (1969). "Swimming speeds of fish." *FAO Fish Rep. 62, Proc. FAO Conference on fish behaviour in relation to fishing techniques and tactics*. Bergen 19-27 October 1967.
- Brett, J. R. (1964). "The respiration metabolism and swimming performance of young sockeye salmon." *J. Fish Res. Bd Can.*, Vol. 21, pp. 1183-1226.
- Brett, J. R. (1967). "Swimming performance of sockeye salmon (*Oncorhynchus nerka*) in relation to fatigue time and temperature." *J. Fish Res. Bd Can.*, Vol. 24, pp. 1731-1741.
- Broughton, N. M., Goldspink, G. and Jones, N. V. (1980) "The effect of training on the lateral musculature of O-group roach, *Rutilus rutilus* (L.), and their fatigue in subsequent exercise tests." *J. Fish Biol.*, Vol. 17, pp. 209-217.
- Colavecchia, M. and Katopodis, C. (1998). "Measurement of burst swimming performance in wild Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) using digital telemetry." *Regul. Rivers: Res. Mgmt.*, Vol. 14, pp. 41-51.
- Davison, W. and Goldspink, G. (1984). "The cost of swimming for two teleost fish." *New. Z. J. Zool.*, Vol. 11, pp. 225-232.
- Farrell, A. P. and Steffensen, J. F. (1987) "An analysis of the energetic costs of the branchial and cardiac pumps during sustained swimming." *Fish Physiol. Biochem.*, Vol. 4, pp. 73-79.
- Fausch, K. D. and Young, M. K. (1995). *Evolutionary significant units and movement of resident stream fishes: a cautionary tale*. Evolution and the aquatic ecosystem : defining unique units in population conservation. Ed. J. L. Nielson. American Fisheries Society, Symposium 17 : Bethesda, Maryland.
- Furniss, M., Love, M., Firor, S., Moynan, K., Llanos, A., Guntle, and Gubernick, R. (2006). *FishXing 3: User manual and reference*. Software and learning systems for fish passage at culverts. Six Rivers National Watershed Interactions Team, Eureka, CA.
- Hammer C., (1995). "Fatigue and exercise tests with fish." *Comp. Biochem. Physiol.*, Vol. 112A, pp. 1-20.
- Harris, J.H. (1984). "Impoundment of coastal drainages of south-eastern Australia, and a review of its relevance to fish migrations." *Aust. Zool.*, Vol. 21, pp. 235-250.
- Harvey, B. C. (1991). "Interactions among stream fishes: predator induced habitat shifts and larval survival." *Oecologia*, Vol. 87, pp. 29-39.
- Hunter, J. R. (1971). "Sustained speed of jack mackerel, *Trachurus symmetricus*." *Fish Bull.*, Vol. 69, pp. 267-271.
- Jacobs, T. A. (1990). *River Regulation*. In The Murray (Ed. D. Eastburn), pp. 38-58.
- Jones, D. R., Kiceniuk, J. W. and Bamford, O. S. (1974). "Evaluation of the swimming performance of several fish species from the Mackenzie River." *J. Fish Res. Bd Can.*, Vol. 31, pp. 1641-1647.
- Krueger, H.M., Saddler, J.B., Chapman, G.A., Tinsley, I.J. and Lowry, R.R. (1968). "Bioenergetics, exercise, and fatty detection and quantitative estimation of sublethal noisonacids of fish" *Am. Zool.*, Vol. 8, pp. 119-129.
- Mallen-Cooper, M. (2001). *Fish passage in off-channel habitats of the Lower Murray River. Part 1. Overview of fish biology and fish passage*. Wetland Care Australia, NSW.
- Mallen-Cooper, M., Stuart, I. G., Hides-Pearson, F., and Harris, J. H. (1995). *Fish migration in the Murray River and assessment of the Torrumbarry fishway*. Final Report, NRMS Project N002.
- McKeown, B. A. (1984). *Fish Migration*. (Timber Press: USA)
- Peake, S., F.W.H. Beamish, et. al. (1997). "Relating swimming performance of lake sturgeon, *Acipenser fulvescens*, to fishway design". *Can. J. Fish Aquat. Sci.*, Vol. 54, pp. 1361-1366.
- Rulifson, R. A. (1977). "Temperature and water velocity effects on the swimming performance of young-of-the-year striped mullet (*Mugil cephalus*), spot (*Leiostomus xanthurus*), and pinfish (*Lagodon rhomboides*)." *J. Fish Res. Bd Can.*, Vol. 34, pp. 2316-2322.
- Webb, P. W. (1975). "Hydrodynamics and energetics of fish propulsion." *Bull. Fish Res. Bd Can.*, Vol. 190, p. 159.
- Webb, P.W. (1984). "Form and function in fish swimming." *Sci. Amer.*, Vol. 251, pp. 72-82.

(논문번호:07-53/접수:2007.06.05/심사완료:2008.03.07)